

# НОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРОТОНОВ И ЯДЕР ГЕЛИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ПОМОЩИ КАЛОРИМЕТРА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПАМЕЛА

*А. В. Карелин<sup>a\*\*</sup>, О. Адриани<sup>d</sup>, Дж. Барбарино<sup>e</sup>, Г. А. Базилевская<sup>b</sup>, Р. Белотти<sup>f</sup>, М. Боецио<sup>g</sup>, Э. А. Богомолов<sup>c</sup>, Л. Бонечи<sup>d</sup>, М. Бонджи<sup>d</sup>, В. Бонвичини<sup>g</sup>, С. Боттаи<sup>d</sup>, А. Бруно<sup>f</sup>, А. Вакки<sup>g</sup>, Е. Вануччини<sup>d</sup>, Г. И. Васильев<sup>c</sup>, С. А. Воронов<sup>a</sup>, А. М. Гальпер<sup>a</sup>, К. Де Донато<sup>h</sup>, К. Де Сантис<sup>h</sup>, Н. Де Симоне<sup>h</sup>, В. Де Феличе<sup>h</sup>, В. Г. Зверев<sup>a</sup>, Дж. Зампа<sup>g</sup>, Н. Зампа<sup>g</sup>, Ф. Кафанья<sup>f</sup>, Д. Кампана<sup>e</sup>, Р. Карбоне<sup>e,h</sup>, П. Карлсон<sup>i</sup>, М. Казолино<sup>h</sup>, Д. Кастеллини<sup>j</sup>, А. Н. Квашнин<sup>b</sup>, С. В. Колдашов<sup>a</sup>, С. А. Колдобский<sup>a</sup>, С. Ю. Крутков<sup>c</sup>, А. А. Леонов<sup>a</sup>, В. Мальвецци<sup>h</sup>, Л. Марчелли<sup>h</sup>, М. Мартуччи<sup>h</sup>, А. Г. Майоров<sup>a</sup>, В. В. Малахов<sup>a</sup>, В. Менн<sup>k</sup>, М. Мерге<sup>h</sup>, В. В. Михайлов<sup>a</sup>, Э. Мокьютти<sup>g</sup>, А. Монако<sup>f</sup>, Н. Мори<sup>d</sup>, Дж. Остерия<sup>e</sup>, Ф. Пальма<sup>h</sup>, П. Папини<sup>d</sup>, М. Пирс<sup>i</sup>, П. Пикоцца<sup>h</sup>, Ч. Пизолотто<sup>g</sup>, М. Риччи<sup>l</sup>, С. Риччиарини<sup>d</sup>, М. Симон<sup>k</sup>, Р. Саркар<sup>h</sup>, Р. Спарволи<sup>h</sup>, П. Спилантини<sup>d</sup>, Ю. И. Стожков<sup>b</sup>, Ю. Т. Юркин<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва, Россия*

<sup>b</sup> *Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия*

<sup>c</sup> *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>d</sup> *INFN, Structure of Florence and Physics Department of University of Florence, I-50019, Florence, Italy*

<sup>e</sup> *INFN, Structure of Naples and Physics Department of University of Naples, I-80126, Naples, Italy*

<sup>f</sup> *INFN, Structure of Bari and Physics Department of University of Bari, I-70126, Bari, Italy*

<sup>g</sup> *INFN, Structure of Trieste and Physics Department of University of Trieste, I-34012, Trieste, Italy*

<sup>h</sup> *INFN, Structure of Rome Tor Vergata and Physics Department of University of Rome Tor Vergata, I-00133, Rome, Italy*

<sup>i</sup> *KTH, Department of Physics, and the Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova University Centre 10691, Stockholm, Sweden*

<sup>j</sup> *Institute of Applied Physics, 50019, Florence, Italy*

<sup>k</sup> *Universitat Siegen, D-57068, Siegen, Germany*

<sup>l</sup> *INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, I-00044, Frascati, Italy*

Поступила в редакцию 11 марта 2014 г.

Новые измерения энергетических спектров протонов и ядер гелия космических лучей с существенно увеличенной статистикой благодаря усовершенствованию методики отбора событий и вовлечению в анализ всех данных за период 2006–2013 гг. были проведены при энергиях выше 0.8 ТэВ/н с помощью позиционно-чувствительного калориметра по данным спутникового эксперимента ПАМЕЛА.

DOI: 10.7868/S0044451014090107

\*E-mail: karelin@hotmail.ru

\*\*A. V. Karelin, O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Boneci, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, A. Vacchi, E. Vannuccini, G. I. Vasilyev, S. A. Voronov, A. M. Galper, C. De Donato, C. De Santis, N. De Simone, V. Di Felice, V. G. Zverev, G. Zampa, N. Zampa, F. Cafagna, D. Campana, R. Carbone, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, A. N. Kvashnin, S. V. Koldashov, S. A. Koldobskiy, S. Y. Krutkov, A. A. Leonov, V. Malvezzi, L. Marcelli, M. Martucci, A. G. Mayorov, V. V. Malakhov, W. Menn, M. Merge, V. V. Mikhailov, E. Mocchiutti, A. Monaco, N. Mori, G. Osteria, F. Pal-

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Последние измерения энергетического спектра протонов космических лучей, проведенные в эксперименте AMS-02 [1], демонстрируют при высоких энергиях вплоть до 1.8 ТэВ более крутое, чем по сте-

ма, Р. Папини, М. Пирс, Р. Пикоцца, С. Пизолотто, М. Риччи, С. В. Риччиарини, М. Симон, Р. Саркар, Р. Спарволи, П. Спилантини, Ю. И. Стожков, Ю. Т. Юркин

пенному закону с показателем  $-2.7$ , убывание спектра. Для энергий в диапазоне 1 ТэВ и выше такое поведение спектра не совпадает с результатами, полученными в аэростатных экспериментах АТИС [2] и CREAM [3], а также в спутниковом эксперименте ПАМЕЛА. В последнем эксперименте существуют два типа измерений. Первый тип измерений осуществляется с помощью магнитного анализа (спектрометра) вплоть до энергий 1.2 ТэВ [4], тогда как другой тип измерений выполняется с помощью калориметра и позволяет расширить энергетический диапазон до 10 ТэВ [5]. Последнее особенно важно с той точки зрения, что полностью перекрыть диапазон 1–10 ТэВ в прямых измерениях за последние 40 лет удалось только в аэростатном эксперименте АТИС [2].

В свете изложенных обстоятельств было особенно важно с большей надежностью, благодаря модернизации методики отбора событий и существенно увеличенной статистике, провести повторные измерения спектра протонов с помощью калориметра в диапазоне 1–10 ТэВ в эксперименте ПАМЕЛА.

Кроме того, следует отметить, что последние данные, полученные в упомянутых выше экспериментах AMS-02, АТИС, ПАМЕЛА, свидетельствуют о различии показателей степенных спектров протонов и ядер гелия космических лучей. При крайне малом количестве разрозненных результатов наблюдений чтобы проверить этот факт расхождения в поведении энергетических спектров протонов и ядер гелия при энергиях выше 1 ТэВ/н (ТэВ/нуклон), было важно увеличить диапазон энергий. Это удалось сделать с помощью калориметра. За счет существенно увеличенной статистики в измерениях при помощи калориметра ПАМЕЛА область измерения спектра ядер гелия была расширена вплоть до энергий 9 ТэВ/н.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ ПАМЕЛА

Экспериментальный комплекс ПАМЕЛА [6] в составе космического аппарата «Ресурс ДК1» был выведен на орбиту Земли в июне 2006 г., и измерения на орбите продолжают по сегодняшний день.

Прибор ПАМЕЛА (рис. 1) состоит из нескольких детекторов: системы времени пролета с тремя двойными плоскостями сцинтилляторов, магнитного спектрометра с системой координатных кремниевых детекторов, электромагнитного калориметра, нижнего ливневого сцинтилляционного детектора  $C_4$ , детектора нейтронов и счетчиков системы антисовпадений. Геометрический фактор для частиц

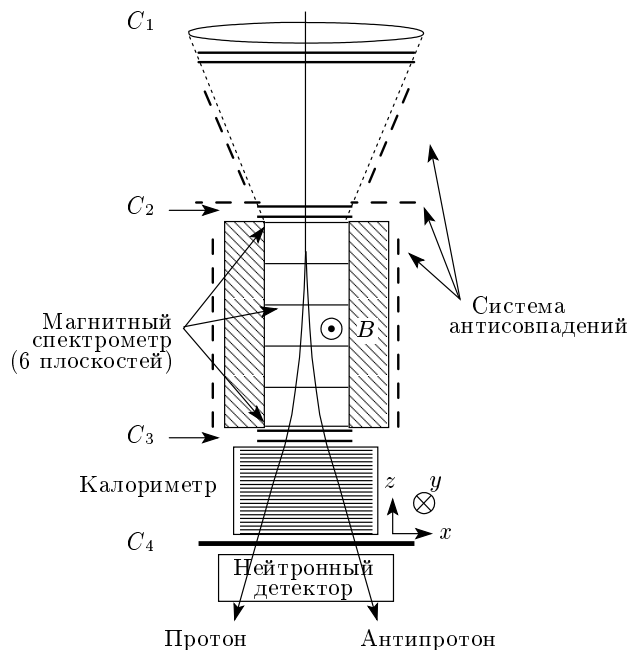


Рис. 1. Состав прибора ПАМЕЛА

высоких энергий ( $> 1$  ТэВ), проходящих в пределах чувствительного объема магнитного спектрометра, равен  $21.6 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ , что соответствует угловой апертуре  $19^\circ \times 16^\circ$ . Эта апертура является основной апертурой прибора.

Калориметр [7] состоит из 22 слоев. Каждый слой образован из двух плоскостей кремниевых стриповых детекторов и пластины из вольфрама толщиной 2.3 мм ( $Z = 74$ ,  $A = 183.84$ ,  $\rho = 19.3 \text{ г/см}^3$ ,  $X_0 = 0.35 \text{ см}$ ). Каждая плоскость кремниевых детекторов включает в себя 96 стрипов с шагом 2.2 мм, причем стрипы в соседних плоскостях расположены ортогонально друг другу, что позволяет измерять пространственное распределение частиц в событиях в калориметре в двух проекциях. Суммарная толщина калориметра составляет 0.6 ядерной длины взаимодействия (17 рад. длин). Подробное описание всех систем и устройство прибора ПАМЕЛА приводится в работе [6].

Одной из возможностей прибора является увеличение светосилы вследствие регистрации частиц с помощью специальных триггеров, вырабатываемых позиционно-чувствительным калориметром и нижним сцинтилляционным детектором  $C_4$ . Эти триггеры вырабатываются при условии превышения энергосодержания внутри калориметра или детектора  $C_4$  пороговых величин, которые соответствуют возникновению мощного каскада вторичных частиц в ка-

лориметре при взаимодействии налетающих частиц с его веществом. При этом частицы приходят в более широкой, чем основная, апертуре. Это позволяет в несколько раз увеличить статистику регистрируемых частиц высоких энергий.

### 3. АНАЛИЗ СОБЫТИЙ

Отбор событий с последующим восстановлением энергетических спектров протонов и ядер гелия в основе своей осуществлялся согласно методике, подробно изложенной в работах [5, 8–10], поэтому в данной работе речь пойдет только об основных различиях в методике отбора, которые позволили существенно увеличить статистику.

Для первоначального отбора событий основным критерием являлась пороговая величина полного энерговыделения в калориметре. Она измеряется в единицах «мип», 1 мип соответствует энерговыделению, которое регистрируется при прохождении одной минимально ионизирующей частицы в одном слое детекторов. Установление порога по полному энерговыделению в калориметре позволяет выделять частицы высоких энергий, испытавшие взаимодействие в калориметре. Таким образом, в дальнейшем рассматривались только события, сопровождавшиеся ливнем в калориметре. В методике, использовавшейся ранее, порог по энерговыделению был установлен равным 4000 мип, что соответствовало энергии протонов 50 ГэВ. В новой модернизированной методике, созданной для измерений энергий около 1 ТэВ и выше, величина порога была поднята до 25000 мип.

В работах [5, 8–10] отмечалось, во-первых, что полные энерговыделения от развившихся в калориметре ПАМЕЛА ливней вторичных частиц, вызываемых электронами и протонами с одной и той же первичной энергией, при регистрации отличается примерно в три раза. Во-вторых, практически все электроны при прохождении калориметра ПАМЕЛА вызывают ливни, начинающиеся в первых плоскостях калориметра, тогда как около 2/3 протонов проходят калориметр без образования ливня. В-третьих, необходимо введение специальных критериев отбора для режекции электронов при выделении протонов. На основании этого при введении критерия на начало ливня частицы, давшие ливень в первых плоскостях калориметра, не проходили отбор. Таким образом, удалось исключить более 96 % электронов. Однако при этом терялось и до 2/3 общего числа протонов, давших ливень в калориметре.

В настоящем анализе нижняя граница энер-

гий, соответствующая 25000 мип, при измерении энергетического спектра протонов лежит в районе 800 ГэВ, что с точки зрения регистрации калориметром ливней соответствует электронам с энергией не менее 260 ГэВ. С учетом доли электронов по сравнению с протонами в космических лучах при этих энергиях было определено, что примесь электронов при выделении протонов с энергией выше 800 ГэВ составляет величину  $10^{-5}$ , что пренебрежимо мало. Тем самым, не применяя специального дополнительного отбора для режекции электронов, можно повысить статистику для протонов при высоких энергиях в три раза.

Для дальнейшего увеличения статистики протонов и ядер гелия были использованы не только те события, которые соответствуют «основной» апертуре прибора, но также часть событий, в которых частицы проходят в более широкой области. Траектория первичной частицы в калориметре определялась с помощью методики для измерения направления частиц по каскаду в калориметре в расширенной апертуре [11]. Затем траектория частицы экстраполировалась назад к магнитному спектрометру для проверки ее прохождения в расширенной апертуре спектрометра, т. е. на высоте первой и последней плоскостей трека магнитного спектрометра проверяется тот факт, что восстановленные  $x$ - и  $y$ -координаты находятся в интервале на 1 см большем, чем соответствующие условию прохождения частицы через «основную» апертуру. Применяя эту методику, удалось добиться увеличения статистики протонов и ядер гелия в 2–3 раза.

Отбор по величине заряда осуществлялся, как и в прежней методике [5, 8–10], по величине ионизационных потерь в сцинтилляторах время-пролетной системы, а для определения первоначальной энергии использовалась величина полного энерговыделения в калориметре, деленная на количество сработавших стрипов.

В процессе восстановления энергетических спектров по экспериментальным данным для протонов и ядер гелия применялась основанная на теореме Байеса итерационная методика, подробно описанная в работе [12].

### 4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В предыдущих работах [5, 8–10] результаты измерения энергетических спектров протонов и ядер гелия с помощью калориметра ПАМЕЛА были получены на основании данных 2006–2009 гг. Результаты

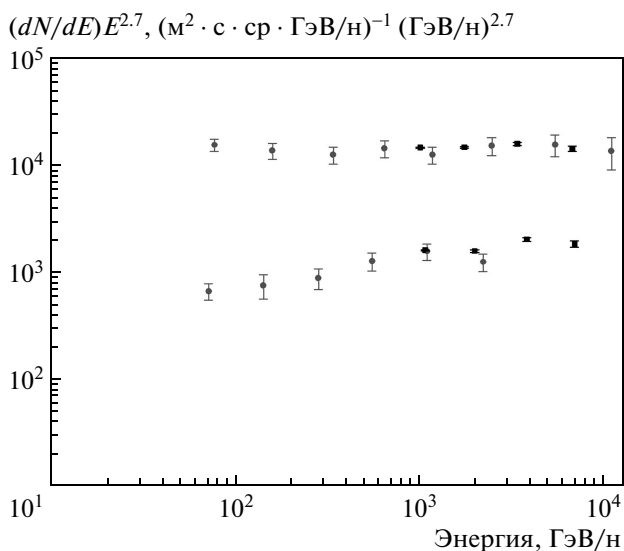


Рис. 2. Сравнение энергетических спектров протонов и ядер гелия космических лучей, полученных с помощью калориметра ПАМЕЛА в предыдущей [5] (серые точки) и настоящей (черные точки) работах

в настоящей работе получены при обработке экспериментальных данных, полученных в 2006–2013 гг. Таким образом, продолжительность измерений была почти вдвое больше.

На рис. 2 представлены результаты измерения энергетических спектров протонов и ядер гелия, полученные ранее в работе [5] и в настоящей работе. Приведены только статистические ошибки. Очевидно, что спектры протонов совпадают, в то же время результаты последних измерений имеют заметно меньшие статистические ошибки. Энергетический диапазон для ядер гелия за счет существенно-го увеличения статистических данных удалось расширить в сторону более высоких энергий вплоть до 9 ТэВ/н. В общей для обоих полученных спектров ядер гелия области энергий они полностью совпадают.

На рис. 3 приведено сравнение последних результатов измерений по калориметру ПАМЕЛА, с результатами двух баллонных экспериментов — АТИС-2 и СРЕАМ, — полученных также с использованием калориметра, входящего в состав установок в каждом из этих экспериментов.

Рисунок 4 позволяет сравнить последние результаты измерений с помощью калориметра прибора ПАМЕЛА со спектрами, полученными ранее с помощью магнитного анализа в эксперименте ПАМЕЛА [4], а также с последними опубликованными

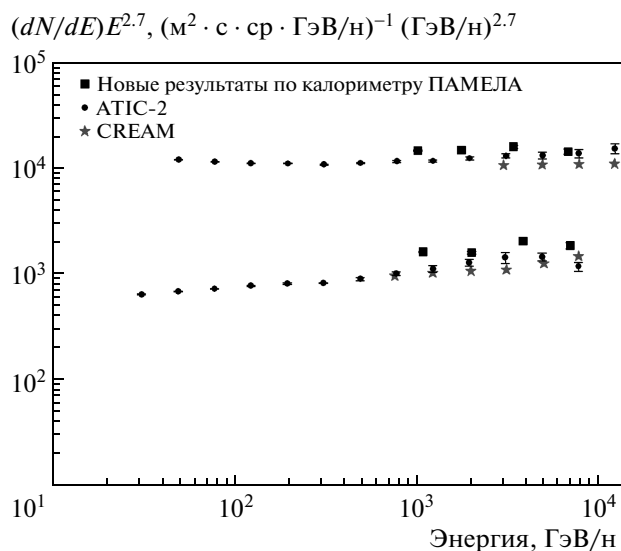


Рис. 3. Сравнение результатов измерений при помощи калориметра в настоящей работе, со спектрами, полученными в баллонных экспериментах АТИС-2 [2] и СРЕАМ [3]

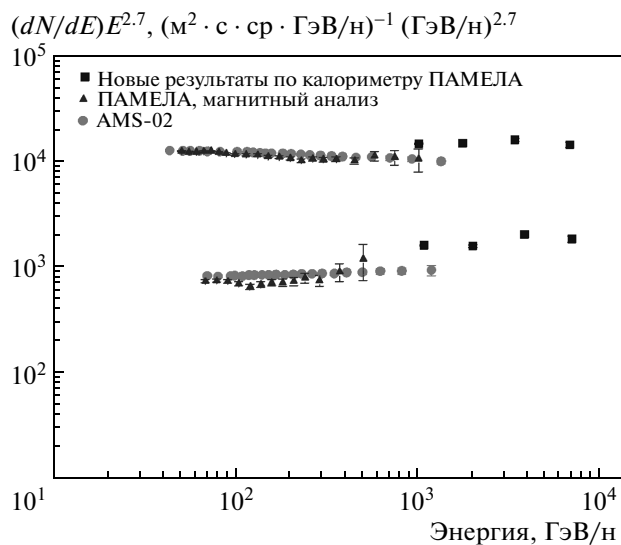


Рис. 4. Сравнение результатов измерений энергетических спектров протонов и ядер гелия с помощью калориметра в настоящей работе с результатами магнитного анализа в эксперименте ПАМЕЛА [4], а также с данными эксперимента AMS-02 [13]

результатами эксперимента AMS-02 по энергетическим спектрам протонов [1] и ядер гелия [13]. Видно, что спектры, полученные с помощью калориметра ПАМЕЛА, лежат выше точек AMS-02. Показатели

спектра в эксперименте AMS-02 при энергиях выше 200 ГэВ/н соответствуют величинам для протонов около  $-2.79$  (ошибка измерения не более 0.01) и для ядер гелия  $-2.64$  (ошибка измерения не более 0.03), а показатели спектра из работы [5] по данным калориметра ПАМЕЛА были равны при энергиях выше 200 ГэВ/н для ядер гелия  $-2.43 \pm 0.02$ , для протонов  $-2.64 \pm 0.01$ . В новых измерениях с помощью калориметра при энергиях выше 0.8 ГэВ/н показатели равны  $-2.67 \pm 0.02$  и  $-2.59 \pm 0.03$  соответственно для протонов и ядер гелия. Разные значения показателей спектра в разных энергетических областях свидетельствуют о нестепенном характере спектров.

Одновременно следует отметить, что в спектре ядер гелия, полученном магнитным спектрометром ПАМЕЛА, наблюдается некоторая особенность в области 200–500 ГэВ/н. Эта особенность представляет собой некоторое уплощение (изменение показателя) спектра. При этом экстраполяция спектра в этой области приводит к стыковке с результатами измерений калориметром ПАМЕЛА, полученными в данной работе. В то же время в спектре AMS-02 такого уплощения не наблюдается.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, рассматривая совместно результаты измерений энергетических спектров протонов и ядер гелия калориметром ПАМЕЛА при более низких энергиях [5] и полученные в настоящей работе результаты при энергиях выше 0.8 ТэВ/н, можно сделать следующие выводы.

1. Спектры протонов и ядер гелия имеют различные показатели во всем диапазоне энергий — от 50 ГэВ/н:  $-2.70 \pm 0.01$  для протонов,  $-2.47 \pm 0.02$  для гелия [5], причем при высоких энергиях различие становится менее существенным — от 800 ГэВ/н:  $-2.67 \pm 0.02$  для протонов,  $-2.59 \pm 0.03$  для гелия по новым результатам измерений.

2. Из приведенных на рис. 2 комбинированных результатов видно, что у ядер гелия в области энергий 0.1–1 ТэВ/н происходит изменение показателя спектра.

3. Из рис. 4 видно, что особенность в поведении спектра ядер гелия, зарегистрированная магнитным спектрометром ПАМЕЛА [4], в большей степени соответствует последним результатам, полученным при помощи калориметра ПАМЕЛА, чем результатам AMS-02 [13].

4. Как это видно из рис. 4, аппроксимация спектра протонов AMS-02 простым степенным законом в область более высоких энергий противоречит результатам измерений при помощи калориметра ПАМЕЛА.

Авторы выражают благодарность за поддержку Российскому научному фонду (грант № 14-12-00373).

## ЛИТЕРАТУРА

1. S. Haino, 33<sup>d</sup> ICRC, The Astroparticle Physics Conf., Rio de Janeiro, Brazil (2013).
2. А. Д. Панов, Дж. Х. Адамс (мл.), Х. С. Ан и др., Изв. РАН, сер. физ. **73**, 602 (2009) [A. D. Panov, J. H. Adams, H. S. Ahn et al., Bulletin RAS: Phys. **73**, 564 (2009)].
3. H. S. Ahn, P. Allison, M. G. Bagliesi et al., *Astrophys. J. Lett.* **714**, 89 (2010).
4. O. Adriani, G. Barbarino, A. V. Karelin et al., *Science* **332**(6025), 69 (2011).
5. O. Adriani G. Barbarino, A. V. Karelin et al., *Adv. Space Res.* **51**, 219 (2013).
6. P. Picozza, A. M. Galper, G. Castellini et al., *Astropart. Phys.* **27**, 296 (2007).
7. M. Boezio, V. Bonvicini, E. Mocchiutti et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **487**, 407 (2002).
8. С. В. Борисов, С. А. Воронов, А. В. Карелин и др., Кратк. сообщ. по физике **38**(3), 15 (2011).
9. А. В. Карелин, О. Адриани, Дж. Барбарино и др., Изв. РАН, сер. физ. **75**, 358 (2011).
10. A. V. Karelin, S. V. Borisov, A. M. Galper, and S. A. Voronov, *Astrophys. Space Sci. Trans.* **7**, 235 (2011).
11. С. В. Борисов, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, А. В. Карелин, ПТЭ **1**, 5 (2013).
12. G. D'Agostini, *Nucl. Instr. Meth. A* **362**, 487 (1995).
13. V. Choutko, Precision Measurement of the Cosmic Ray Helium Flux with AMS Experiment, 33<sup>d</sup> ICRC, The Astroparticle Physics Conf., Rio de Janeiro, Brazil (2013).